

***TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI***

Fakulta strojní



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

# **TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

Fakulta strojní

Studijní program : B2341 Strojírenství  
Studijní obor : 3911R018 Materiály a technologie  
Katedra : KSP – Strojírenské technologie  
Zaměření : Tváření kovů a plastů

## **Hodnocení vlastností kompozitu s uhlíkovými nanotrubičkami**

### **Evaluation of properties of composite with carbon nanotubes**

**Bakalářská práce**

Autor : Thang Nguyen Vo  
Vedoucí BP : prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
Konzultant : Ing. Jan Vácha  
Počet stran textu : 45  
Počet obrázků : 29  
Počet tabulek : 16

**V Liberci 25. 05. 2012**

# **OFICIÁLNÍ ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

**Místopřísežné prohlášení:**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci dne 25.5.2012

.....

Thang Nguyen Vo

TX Tay Ninh

Vietnam

## PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych na tomto místě poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu prof.Dr.Ing. Petru Lenfeldovi a konzultantovi panu Ing. Janu Váchovi za odborné konzultace, ochotu, trpělivost a cenné rady při psaní této práce. Také bych chtěl poděkovat mé rodině a přátelům za podporu během studia.

# **Hodnocení vlastností kompozitu s uhlíkovými nanotrubičkami**

## ***Anotace***

Bakalářská práce s názvem Hodnocení vlastností kompozitu s uhlíkovými nanotrubičkami je rozdělena do tří částí. První je teoretická část, která se zabývá kompozitními materiály, uhlíkovými nanotrubičkami, technologií vstřikování. Druhá je experimentální část, která se zabývá použitým materiálem PLASTICYL<sup>TM</sup> PA1503, tj. směs uhlíkových nanotrubiček (CNT) a polyamidu 6. Poté jsou zde popsány vstřikovací forma, vstřikovací lis ARBURG 270S, parametry vstřikování a test mechanických vlastností zkušebních vzorků. Poslední část se zabývá diskusí výsledků.

## ***Annotation***

This Bachelor thesis called Evaluation of properties of composite with carbon nanotubes is divided into three parts. The first is theoretical part which deals with the composite materials, the carbon nanotubes, the injection moulding. The second is experimental part which deals with the used material PLASTICYL<sup>TM</sup> PA1503, it is a mixture of carbon nanotubes (CNT) and polyamid 6. Then here injection mold, injection molding machine ARBURG 270S, injection parameters are described and test of the mechanical properties of samples. The last part deals with the discussion of the results.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Hodnocení vlastností kompozitu

Kompozit s uhlíkovými nanotrubičkami

Struktura a vlastnosti uhlíkových nanotubic

Technologie vstřikování

## **KEY WORDS**

Evaluation of properties of composite

Composite with carbon nanotubes

Structure and properties of carbon nanotubes

Injection moulding

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

CAS	American chemical society	Americká chemická společnost
CNT	Carbon nanotube	Uhlíková nanotrubiice
CVD	Chemical vapor deposition	Chemická depozice par
DWCNT	Double-walled carbon nanotubes	Dvojstěnné uhlíkové nanotrubiice
ESD	Elektrostatický výboj	Elektrostatický výboj
MWCNT	Multi-walled carbon nanotubes	Mnohostěnné uhlíkové nanotrubiice
NB	No break	Bez zlomu
PA6	Polyamide 6	Polyamid 6
PECVD	Plasma enhanced CVD	Plazmochemická depozice
RTG	Rentgen	
SEVNB	Single-Edge-V-Notched Beam	Zkouška v ohybu s vrubem V
SV		Skleněné vlákno
SWCNT	Single-walled carbon nanotubes	Jednostěnné uhlíkové nanotrubiice

## SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN

$l_0$	počáteční délka	[mm]
$l$	konečná délka	[mm]
$p_{vstř}$	max.vstřikovací tlak	[MPa]
$p_z$	zbytkový tlak při otevírání formy	[Mpa]
$s$	směrodatná odchylka	[-]
$v$	variační koeficient	[%]
$v$	objemová vstřikovací rychlost	[cm <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$\varepsilon$	relativní deformace	[-]
$\sigma$	napětí	[MPa]
$D$	průměr šneku	[mm]



$E$	konstanta materiálu (Youngův modul pružnosti) [MPa]	
$F$	síla	[N]
$F_p$	přisouvací síla	[N]
$F_u$	uzavírací síla	[N]
$L$	délka šneku	[mm]
$Q_p$	plastikační kapacita	[kg.h <sup>-1</sup> ]
$Q_v$	vstřikovací kapacita	[cm <sup>3</sup> ]
$S_0$	počáteční průřez	[mm <sup>2</sup> ]
$T_F$	teplota formy	[°C]

## **OBSAH**

<b>1.</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>11</b>
<b>2.</b>	<b>TEORETICKÁ ČÁST</b>	<b>12</b>
<b>2.1</b>	<b>KOMPOZITY</b>	<b>12</b>
2.1.1	Definice	12
2.1.2	Rozdělení kompozitních materiálů	12
2.1.3	Výroba kompozitních materiálů	15
2.1.4	Obecné vlastnosti kompozitů	16
2.1.5	Praktické využití kompozitů	18
<b>2.2</b>	<b>TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ</b>	<b>19</b>
2.2.1	Princip vstřikování	19
2.2.2	Vstřikovací stroje	21
2.2.3	Vstřikovací formy	23
<b>2.3</b>	<b>UHLÍKOVÉ NANOTRUBIČKY</b>	<b>24</b>
2.3.1	Definice	24
2.3.2	Terminologie	25
2.3.3	Typy a struktura nanotrubiček	25
2.3.3.1	Jednovrstvé CNT (SWCNT)	25
2.3.3.2	Vícevrstvé CNT (MWCNT)	26
2.3.4	Vlastnosti nanotrubičky	26
2.3.4.1	Elektrická vodivost	27
2.3.4.2	Optická aktivita	27
2.3.4.3	Mechanická pevnost	27
2.3.5	Metody výroby nanotrubičky	27
2.3.5.1	Výboj elektrického oblouku (Arc Discharge)	27
2.3.5.2	Laserová ablace	28
2.3.5.3	Chemická depozice par (CVD)	28
2.3.6	Aplikace	29
<b>3.</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b>	<b>31</b>
<b>3.1</b>	<b>POPIS POUŽITÉHO MATERIÁLU – PLASTICYL™ PA1503</b>	<b>31</b>
3.1.1	Fyzikální a chemické vlastnosti	32
3.1.2	Infiltrační křivky pro objemový a povrchový odpor	33
<b>3.2</b>	<b>VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES</b>	<b>33</b>
<b>3.3</b>	<b>POPIS STROJE</b>	<b>35</b>
<b>3.4</b>	<b>PARAMETRY VSTŘIKOVÁNÍ</b>	<b>36</b>
<b>3.5</b>	<b>MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ</b>	<b>36</b>
3.5.1	Tahová zkouška	36
3.5.2	Ohybová zkouška	37
3.5.3	Zkouška tvrdosti	38
3.5.4	Rázová zkouška	39
3.5.5	Vrubová zkouška	39
<b>3.6</b>	<b>VÝSLEDKY</b>	<b>40</b>
<b>4.</b>	<b>DISKUSE A ZÁVĚR</b>	<b>44</b>
	<b>POUŽITÁ LITERATURA</b>	<b>46</b>

# 1. ÚVOD

Kompozitní materiály jsou z hlediska průmyslu jednou z nejperspektivnějších a nejrychleji rostoucích odvětví. Kompozitní materiály získávají stále větší uplatnění v technické konstrukční praxi. Používají se všude, dříve v progresivních technických oborech a díky výborným mechanickým vlastnostem stále více pronikají do konstrukcí v dopravní technice, do automobilového průmyslu atd.

Dále se budeme zabývat uhlíkovými nanotrubičkami (CNTs), patří k relativně novým nanomateriálům a jsou nadějným materiálem blízké budoucnosti. Vynikající mechanické, tepelné a elektrické vlastnosti dělají nanotrubičky ideální pro řadu aplikací. Jsou to zejména ideální prostředky pro moderní výplňový materiál v kompozitech. CNTs jsou považovány za nejlepší nanočástice pro vysoce výkonné, multifunkční kompozity. Nicméně při zpracování vznikají v mnoha případech obtíže, které brání praktickému využití.

Hlavním úkolem bakalářské práce bylo vytvořit vzorky nového kompozitního materiálu s uhlíkovými nanotrubičkami. Vzorky se vytvoří technologií vstřikování z granulátů PLASTICYL<sup>TM</sup> PA1503 s příslušnými parametry vstřiku. Dále se provedlo měření mechanických vlastností a jsou zde uvedeny naměřené hodnoty. V závěru je diskuse o výsledcích a využití nového materiálu.

## 2. TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 KOMPOZITY

#### 2.1.1 Definice

Kompozitní materiály se staly v současné době průmyslovými materiály používanými na celém světě. Zpočátku se nejvíce používaly v lodním průmyslu, ale velmi rychle se jejich použití rozšířilo i do průmyslu chemického, leteckého, automobilového, elektrotechnického, spotřebního, a výroby sportovních potřeb. Využití méně náročných kompozitů používaných pouze z důvodů snížení nákladů v průmyslu stoupá a jejich použití se stále rozšiřuje [1].

Kompozitní materiály patří mezi materiály s nejúčinnějším využitím potenciálních vlastností hmoty, čímž dochází k výrazným energetickým úsporám při jejich výrobě a k vysokému využití konstrukce. Avšak použití některých kompozitních materiálů je značně omezeno jejich teplotní odolností a v současné době vyvstává problém s případnou recyklací [1].

První definice : Kompozity jsou složené materiály, které se liší od slitin tím, že jednotlivé složky si ponechávají své charakteristiky [2].

Druhá definice : Kompozity jsou multifunkční materiálové systémy, které mají charakteristiky z jednotlivých materiálů. Jsou to kohezivní struktury, vytvořené fyzikální kombinací dvou nebo více kompatibilních materiálů, lišících se složením a vlastnostmi [2].

Třetí definice : Kompozity jsou takové heterogenní materiály, které po smíchání materiálů odlišnými vlastnostmi vytvoří jednu strukturu. Jestliže se vlastnosti doplňují, vzniká kompozitní materiál s lepšími vlastnostmi [2].

Kompozity tvoří jedna nebo více nespojitých fází, ponořených ve spojitě fázi. Diskontinuitní fáze je obvykle tvrdší a pevnější než spojitá fáze a nazývá se **výztuž** nebo **vyztužovací materiál**, zatímco spojitá fáze se nazývá **matrice** [1].

#### 2.1.2 Rozdělení kompozitních materiálů

Kompozity lze rozdělit podle různých hledisek

1. Podle materiálu výztuže (plniva)
  - Kovy (W, Fe, Cr, Mo, Ti, Ni a jejich slitiny)
  - Nekovové materiály
    - Anorganické materiály : keramické materiály ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ , SiC, TiC...), skla (E, S), C, B, čedič
    - Organické materiály : polymery (aramidová vlákna-Kevlar, polyamidová vlákna-Nylon...) [3]
2. Podle materiálu matrice
  - Kovy (Al, Ag, Fe, Mg, Ti, Co, Cu, Ni...a jejich slitiny)

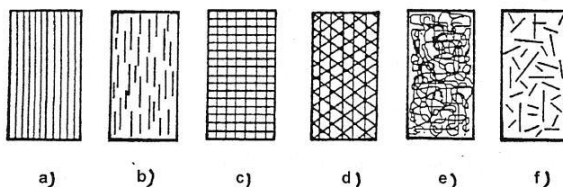
- Nekomové materiály
  - Anorganické materiály : keramické materiály ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , SiC,  $\text{SiO}_2$ , TiC, ...), skla (E, S), C
  - Organické materiály : polymery (polyestery, fenolické pryskyřice, epoxidy, polyamidy...) [3]

Kompozit může být typu kov-kov, polymer-polymer, keramika-keramika, keramika-kov, keramika-polymer, apod. Samozřejmým předpokladem je však dobrá mezifázová adheze a vhodné deformačně-napěťové vlastnosti. Jako zajímavost lze uvést, že existují kompozity u kterých je materiál výztuže stejný, pouze v jiné formě [3].

3. Podle geometrického tvaru výztuže (nosné části), plniva

- Vláknové
- Částicové
- Skeletové

Charakteristické typy vláknových kompozitů jsou graficky znázorněny na obrázku 2.1.2.1 [3].

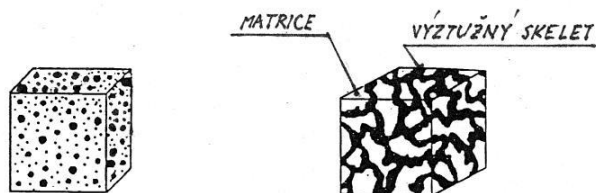


*Obr.2.1.2.1 : Typy vláknových kompozitů [3].*

- a) Jednosměrná dlouhá vlákna
- b) Jednosměrná krátká vlákna
- c) Dvousměrné vyztužení (křížová tkanina)
- d) Vícesměrné vyztužení
- e) Náhodná orientace vláken
- f) Náhodná orientace krátkých vláken [3]

U částicových kompozitních materiálů (viz. obr.2.1.2.2) jsou vyztužující částice dispergovány v matrici a omezují rozvoj plastických deformací, čímž zvyšují mez kluzu, mez pevnosti, tvrdost a samozřejmě ovlivňují celou řadu dalších vlastností [3].

Skeletový kompozitní materiál (viz. obr.2.1.2.2) je tvořen pórovitou matricí prostoupenou souvislým nosným skeletem [3].

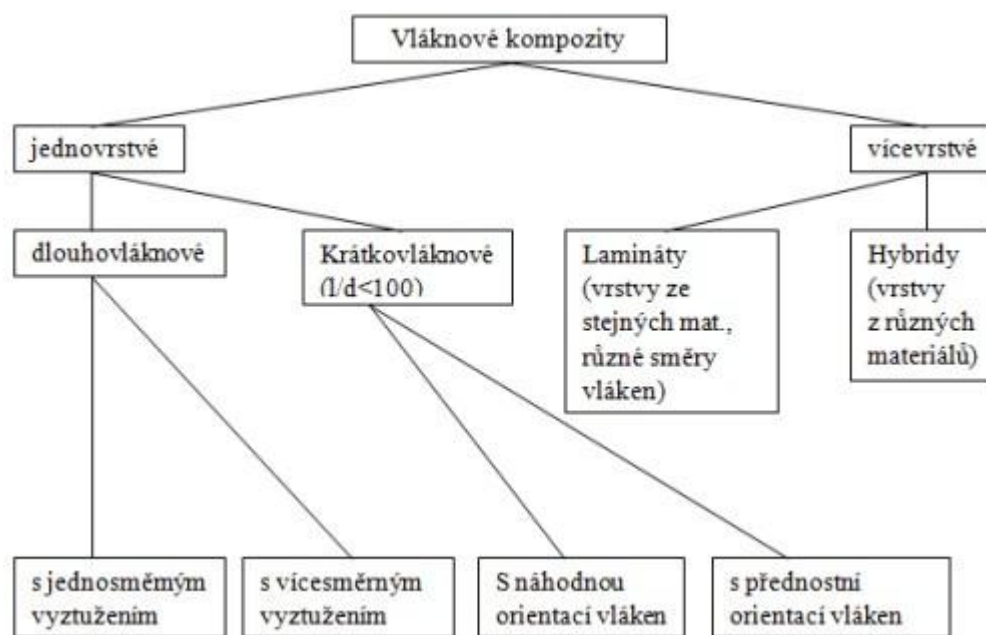


Obr.2.1.2.2 : Částicový a skeletový kompozitní materiál [3].

4. Podle použití

- Žárupevné, žáruvzdorné, korozivzdorné, aplikace v letectví, strojírenských výrobních technologiích, stavebnictví,...[3].

Především se budeme zabývat vláknovými konstrukčními kompozitními materiály. Podrobnější rozdělení těchto kompozitů z hlediska geometrického uspořádání vláken je uvedena na obr.2.1.2.3 [3].



Obr.2.1.2.3 : Vláknové kompozity z geometrického pohledu [3].

### 2.1.3 Výroba kompozitních materiálů

Vlastní výrobní technologie spojení nosné části (vlákna) a pojiva (matrice) závisí do značné míry na materiálu matrice. U kompozitních materiálů s polymerní matricí se používá laminace, tlakového vytlačování či tažení, při použití kovových matric se používá laminování, válcování či vytlačování. Technologické výrobní postupy používané u dlouhoválnových a krátkoválnových kompozitů jsou přehledně uvedeny v tabulce 2.1.3.1 [3].

Tab.2.1.3.1 : Výrobní technologické postupy kompozitních materiálů [3].

Výrobní technologie	Dlouhé vlákno,organická matrice	Dlouhé vlákno,kovová matrice	Krátké vlákno
Ruční ukládání	x		x
Vakuové zpracování v autoklávu	x		x
Lisování v přípravku	x	x	x
Navíjení	x	x	
Válcování		x	
Nastříkávání			x
Přenos kapalné matrice	x	x	x
Vytlačování		x	x
Tváření tahem	x	x	
Vstřikování			x
Prášková metalurgie			x

U vláknových kompozitů je hlavním problémem vložení vláken do matrice tak, aby se mechanicky nepoškodila, aby bylo zachováno přesné usměrnění a rovnoměrné rozdělení vláken ve výrobku a aby byla zajištěna soudržnost vláken a matrice [2].

Ponoření vláken do tekuté matrice (do kapaliny) může přinést problémy vlivem chemické reakce - difúze do vláken a rekrystalizace nebo rychlé oddělování složek z důvodu rozdílné hmotnosti [2].

Smáčivost je základním předpokladem dobré soudržnosti vláken a matrice. Čím lepší smáčivosti se dosáhne, tím příznivější je kvalita impregnace [2].

**Vstřikování** : mnoho výrobců polymerů dodává přímo granulát polymeru s vlákny v jednotlivých granulích-ať již z termoplastů, nebo reaktoplastů. To umožňuje použít pro výrobu kompozitů jen nepatrně modifikované výrobní zařízení pro vstřikování, vyfukování nebo lisování běžných plastů [4].

- Tavenina plastu má během zpracování (např. vstřikování) zpravidla poměrně vysokou viskozitou. To způsobuje, že se jednotlivá vlákna orientují ve směru toku taveniny (tím lépe, čím je vyšší viskozita a rychlost toku taveniny), takže je možné dosáhnout částečné orientace vláken ve výrobku, případně tuto orientaci ovládat vhodným uspořádáním toku taveniny [4].

### 2.1.4 Obecné vlastnosti kompozitů

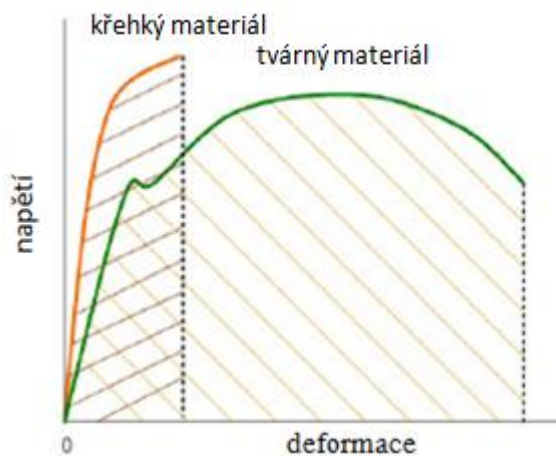
Vlastnosti kompozitů jsou dány kombinací objemových podílů vyztužujících komponent s vysokou pevností, tuhostí a matric s nižším modulem. Vlastnosti kompozitů jsou funkcí vlastností složek, jejich relativních množství, stejně tak jsou funkcí geometrie nespojitě fáze (tj. tvaru a rozměrů, distribuce a orientace) [5].

U klasických kompozitů s dlouhými vlákny se jako vyztužující mechanismus uplatňuje přenos napětí z matrice do výztuže. Podmínkou přenosu je optimálně 2x větší modul pružnosti vláken a existence dostatečně silné vazby s matricí. Snahou je zvýšit jejich odolnost proti porušení prostřednictvím zhouževnaťujících mechanismů. Většina zhouževnaťujících mechanismů využívá vlastností rozhraní mezi vláknem a matricí [5].

Mezi základní mechanické vlastnosti kompozitních materiálů vyztužených dlouhými vlákny patří pevnost, lomová houževnatost a teplotní stabilita [5].

#### 1. Pevnost v tahu

- Nejběžnějším testem pro určení vlastností kompozitních materiálů je zkouška tahem. Slouží k stanovení modulu pružnosti a pevnosti a deformačních charakteristik jako je tažnost. Zkoušku lze provádět při různých podmínkách deformací a teplot.
- Tahová křivka znázorňuje průběh odezvy napětí ve vzorku na deformaci (prodloužení) vyvolanou přístrojem – viz. obr.2.1.4.1
- Na ose  $x$  je znázorněna deformace, kterou působíme na namáhaný materiál, na ose  $y$  se nachází deformace, která je odezvou namáhaného materiálu.



Obr.2.1.4.1 : Závislost napětí na deformaci pro křehké (oranžově) a tvárné materiály (zeleně)[5].

- Deformace je definována vztahem :

$$\varepsilon = (l - l_0) / l_0 \quad (1)$$

Kde  $\varepsilon$  [-] je relativní deformace,  $l_0$  [mm] je počáteční délka vzorku před zatížením a  $l$  [mm] je konečná délka [5].



- Napětí je definováno jako poměr aplikovaného zatížení  $F$  [N] na původní průřez plochy vzorku :

$$\sigma = F/S_0 \quad (2)$$

Kde  $\sigma$  [MPa] je napětí,  $F$  [N] je zatížení a  $S_0$  [mm<sup>2</sup>] je původní průřez [5].

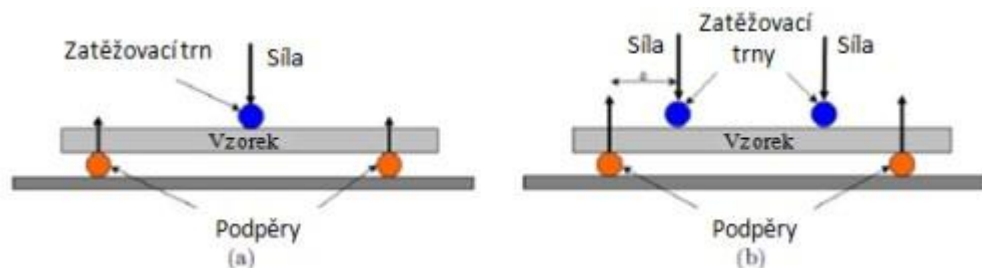
- Z lineární části zatěžování lze stanovit hodnotu modulu pružnosti známého také jako Youngův modul pomocí Hookova zákona ve tvaru :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3)$$

Kde  $\sigma$  [MPa] je napětí,  $E$  [MPa] je modul pružnosti v tahu (Youngův modul) a  $\varepsilon$  [-] je relativní deformace [5].

## 2. Pevnost v ohybu

- Rozlišujeme dva druhy, a to tříbodový a čtyřbodový ohyb – viz. obr.2.1.4.2.
- Při tříbodové zkoušce je těleso podepřeno dvěma podpěrami a prohýbáno uprostřed ležícím protilehlým trnem tak dlouho, dokud se těleso nezlomí nebo deformace nedosáhne předem stanovené hodnoty.
- Při čtyřbodové zkoušce působí na těleso dva trny, které jsou umístěny v polovině vzdálenosti podpěrných trnů. Hodnoty pevností v ohybu jsou u této metody nižší, ale používá se častěji. Důvodem je rovnoměrné zatížení (průběh rozložení napětí) v celé délce zkušebního tělesa mezi zatěžovacími trny [5].



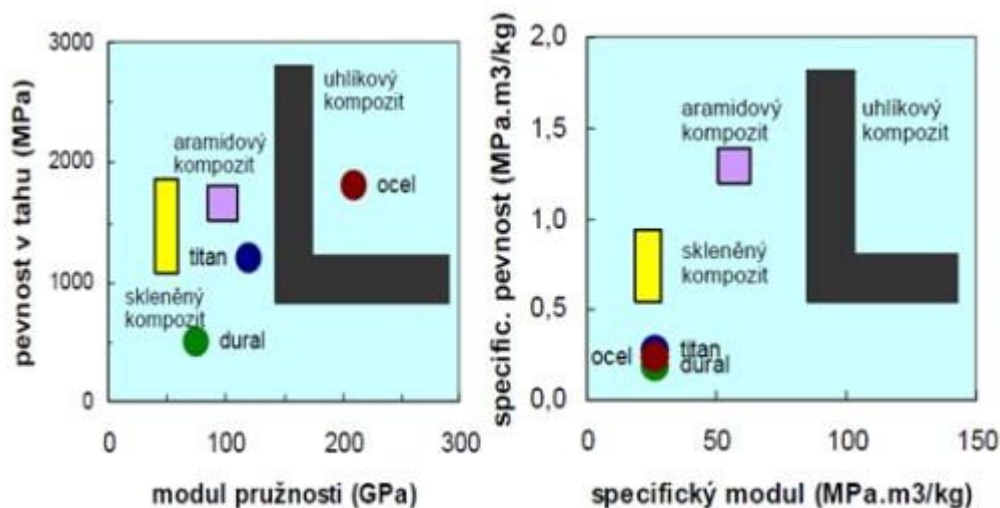
Obr.2.1.4.2 : Ohybový test (a) tříbodový ohyb, (b) čtyřbodový ohyb [5].

## 3. Kompozitní materiály se vyznačují následujícími vlastnostmi

- Nízká specifická hmotnost (až 20 [%] hmotnosti oceli)
- Nízká hodnota momentu setrvačnosti
- Vysoká tuhost
- Téměř nulová tepelná roztažnost
- Vysoká korozní odolnost
- Nemagnetičnost a propustnost RTG paprsků

Obrázky 2.1.4.3 ukazují vztah mezi pevností a tuhostí (modulem pružnosti) u tradičních kovových materiálů a kompozitů. Oblasti vlastností uhlíkových kompozitů jsou vzhledem ke

kovům širší protože lze kombinovat vlákna o různých vlastnostech, např. u uhlíkových kompozitů lze dle potřeby použít buď vlákna o vysokém modulu pružnosti nebo vlákna s vysokou pevností [6].



Obr.2.1.4.3 : Porovnání mechanických vlastností materiálů [6].

## 2.1.5 Praktické využití kompozitů

Kompozitní materiály představují nejúčinnější využití potenciálních možností hmoty, a tím maximalizaci energetických úspor nejen z hlediska materiálu, ale i z hlediska využívání konstrukce [2].

Použití kompozitních materiálů s velkou odolností proti korozi umožňuje prodloužit životnost konstrukcí i ve velmi agresivních prostředích a snížit tak náklady na jejich údržbu na minimum [7].

O největší pokrok v konstrukčním využití kompozitů (převážně vláknového typu) se zasloužil jako obvykle letecký- kosmický-automobilový průmysl a stavebnictví [2].

### ❖ Příklady aplikací :

- Stavebnictví (pláště budov, okenní rámy, pracovní a obslužné plošiny, stavby pro rozvod energie, nástavby na výškové budovy...)
- Nákladní doprava (kontejnery, nákladní návěsy, ramena hydraulických zvedáků, výsuvné plošiny, přívěsy za nákladní i osobní automobily)
- Výroba prostředků pozemní hromadné dopravy (interiéry kolejových vozidel, součásti karosérií kolejových vozidel, autobusy)
- Výroba osobních automobilů
- Letecký a kosmický průmysl
- Výroba vojenské techniky

- Rozvod elektrické energie (rozvaděče, izolátory, sloupy elektrického osvětlení, manipulační tyče...)
- Výroba sportovních potřeb (golfové hole, hokejky...)
- Oblast reklamy (billboardy) [7].

## 2.2 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ

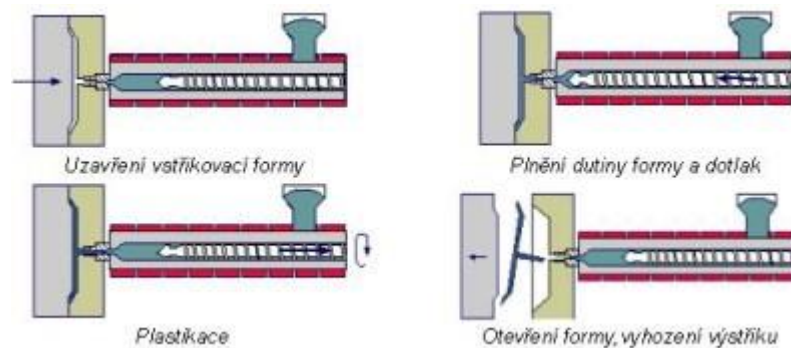
### 2.2.1 Princip vstřikování

Vstřikování je způsob tváření plastů, při kterém je dávka zpracovávaného materiálu (v podobě granulí – viz. obr.2.2.1.1) z pomocné tlakové komory vstříknuta velkou rychlostí do uzavřené dutiny kovové formy, kde ztuhne ve finální výrobek. Potom se forma otevře, výrobek je vyhozen a celý cyklus (viz. obr.2.2.1.2) se opakuje [8].



Granuláty

Obr.2.2.1.1 : Plast v podobě granulí [8].



Obr.2.2.1.2 : Vstřikovací cyklus [8].

- Na počátku vstřikovacího cyklu je dutina formy prázdná a forma je otevřená. V nulovém čase dostane stroj impuls k zahájení vstřikovacího cyklu, pohyblivá část formy se přisune k pevné, forma se zavře a uzamkne – strojní čas.

- Na přisouvání formy se musí vynaložit jen malá přisouvací síla  $F_p$ , zatímco na uzavření formy je nutno vynaložit značně vyšší uzavírací sílu  $F_u$ . Následuje pohyb šneku v tavicí komoře a začíná vlastní vstřikování do dutiny vstřikovací formy.
- Tavenina vstoupí do dutiny formy, ihned začne předávat teplo vstřikovací formě a chladne. Chlazení trvá až do otevření formy a vyjmutí výstřiku. Doba chlazení je závislá na teplotě formy  $T_F$  a tloušťce stěny výrobku. Během chlazení se hmota smršťuje a zmenšuje svůj objem a aby se na výstřiku netvořily propadliny a staženiny, je nutno zmenšování objemu kompenzovat dodatečným dotlačením taveniny do dutiny formy – **dotlak**. Abychom mohli dotlačovat, musí před čelem šneku zůstat určitý objem plastu – **polštář**.
- Po dotlaku začíná plastikace nové dávky plastu. Šnek se začne otáčet, pod násypkou nabírá granulovanou hmotu, plastikuje ji a vtlačuje do prostoru před čelem šneku. Současně ustupuje dozadu, přičemž musí překonávat tzv. protitlak neboli zpětný tlak. Příliš vysoký protitlak by však mohl způsobit až degradaci plastu.
- Během pokračujícího chlazení tlak ve formě dále klesá až na hodnotu zbytkového tlaku  $p_z$ , což je tlak, pod nímž se hmota nachází ve formě těsně před jejím otevřením. Příliš vysoký zbytkový tlak je příčinou vysokých vnitřních pnutí ve výstřicích, které u křehkých hmot mohou způsobovat až samovolné praskání výstřiku. Zbytkový tlak lze snížit buď zkrácením doby dotlaku anebo programovaným průběhem tlaku během dotlaku.
- Po dokonalém zchladnutí výstřiku se forma otevře a výstřik se vyhodí z formy [8].

#### ❖ **Vliv jednotlivých časů vstřikovacího cyklu**

- Strojní doby : doby na zavření formy a na otevření formy závisí na rychlosti pohybujiící se formy a na dráze, kterou musí forma urazit.
- Doba vstřikování : doba plnění dutiny formy se odvíjí od rychlosti vstřikování (od rychlosti pohybu šneku vpřed), která závisí na technologických podmínkách.
- Doba dotlaku : úkolem dotlakové fáze definované dobou dotlaku a tlakovou úrovní dotlaku je v době jejího působení - doba dotlaku - dopravit do chladnoucího výstřiku takové množství taveniny, která působí proti objemové kontrakci při snižování teploty výstřiku, aby smrštění výstřiku bylo co nejmenší. Závisí hlavně na průřezu vtokového kanálu.
- Doba plastikace : je čas, který je potřebný k tomu, aby došlo k zplastikování dávky plastu a k jejímu rovnoměrnému zhomogenizování a umístění dávky před čelo šneku.

- Doba chlazení : představuje největší část cyklu. Závisí na určující tloušťce stěny výstřiku, na druhu plastu, teplotě taveniny, teplotě formy a na teplotě výstřiku v okamžiku vyjímání z formy [8,22].

#### ❖ Faktory ovlivňující vlastnosti a kvalitu výstřiku

- Z hlediska volby druhu plastu :
  - rychlost plastikace polymeru
  - tekutost (reologické vlastnosti) plastu
  - dostatečná tepelná stabilita plastu v rozsahu zpracovatelských teplot
  - uvolňování těkavých látek
  - velikost vnitřního pnutí
  - smrštění plastu
- Z technologických parametrů :
  - vstřikovací tlak
  - teplota taveniny
  - teplota formy
  - rychlost plnění dutiny formy
  - výše a doba trvání dotlaku [8]

### 2.2.2 Vstřikovací stroje

Vstřikovací stroj (viz. obr.2.2.2.1) se skládá ze vstřikovací jednotky, uzavírací jednotky a z řízení a regulace. Každý výrobce vstřikovacích strojů je schopen vybavit vstřikovací stroj tak, aby plnil funkci částečně, nebo plně automatizovaného pracoviště [8].

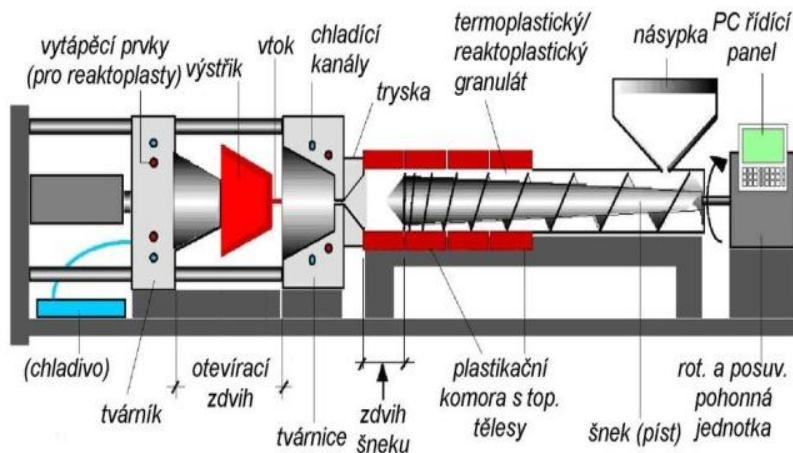


Schéma vstřikovacího stroje

Obr.2.2.2.1 : Schéma vstřikovacího stroje [8].

### ➤ Vstřikovací jednotka

Plní dva hlavní úkoly: přeměňuje granulát plastu na homogenní taveninu o dané viskozitě, vstřikuje taveninu vysokou rychlostí a velkým tlakem do dutiny formy [8].

První vstřikovací jednotky, které byly použity pro vstřikování plastů již na konci minulého století, byly jednotky pístové. Udržely se až do poloviny 20. století, kdy byly postupně zcela vytlačeny jednotkami šnekovými. Konstrukcí šnekových vstřikovacích strojů byly s úspěchem vyřešeny všechny hlavní nedostatky pístových strojů [8].

Mezi největší přednosti šnekových strojů patří :

- Spolehlivá plastikace a dobrá homogenizace roztaveného plastu
- Zabránění přehřívání materiálu v tavící komoře
- Vysoký plastikační výkon i velký zdvihový objem, takže velikost výstřiku lze teoreticky libovolně zvyšovat
- Odstranění potíží při čištění komory při výměně materiálu
- Zaručené přesné dávkování hmoty
- Nízké ztráty tlaku během pohybu hmoty
- Vyšší účinnost zásahu do vstřikovacího procesu, např. řízením dotlaku [8]

Vstřikovací jednotka se šnekovou plastikací je charakterizována těmito parametry : průměrem  $D$  [mm] a délkou  $L$  [mm] šneku, vstřikovací kapacitou  $Q_v$  [cm<sup>3</sup>], plastikační kapacitou  $Q_p$  [kg.h<sup>-1</sup>], max. vstřikovacím tlakem  $p_{vstř}$  [MPa], objemovou vstřikovací rychlostí  $v$  [cm<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>] a tím, zda je stroj vybaven universálním a nebo speciálním šnekem [8].

Na šneku je možno rozlišit tři funkční pásma. Důležitou částí šneku je jeho zakončení, neboť tavenina má při vstřikování snahu téci šnekovým kanálem zpět směrem k násypce. Délka šneku u vstřikovacích strojů na termoplasty bývá obvykle 15 až 20  $D$ . Šneky, ať už obyčejné nebo diferenciální, mohou existovat v různém provedení [8].

### ➤ Uzavírací jednotka

Úkolem uzavírací jednotky je zavírat a otevírat formu dle procesu vstřikování a zajistit uzavření formy takovou silou, aby se při vstříknutí tlakem taveniny forma neotevřela. Současné moderní stroje mají programovatelnou rychlost a sílu uzavírání vstřikovací formy [8].

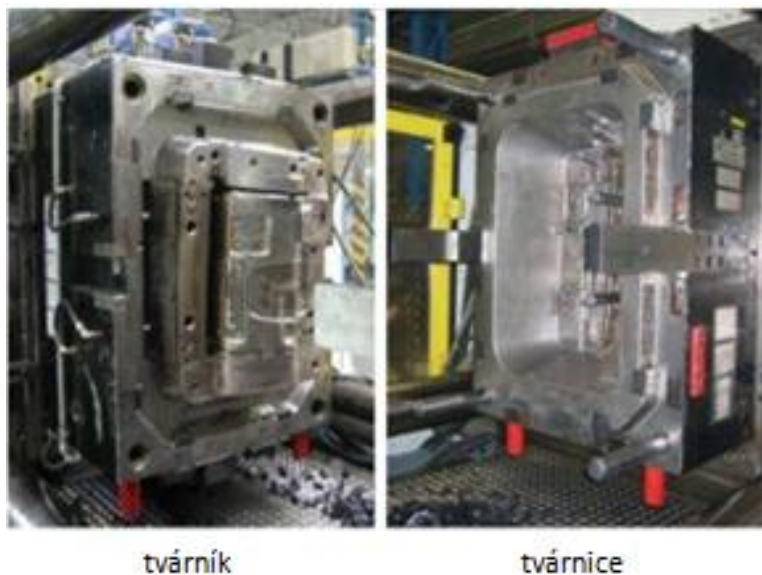
Uzavírací jednotka se skládá z těchto hlavních částí : opěrné desky pevně spojené s ložem stroje, pohyblivé desky, na kterou je upnuta pohyblivá část formy, upínací desky s otvorem pro trysku stroje, na kterou se připevní nepohyblivá část vstřikovací formy, vedení pro pohyblivou desku, z uzavíracího a přidržovacího mechanismu. Vstřikovací

stroje používají v současné době různé uzavírací systémy, které např. mohou být konstruovány jako hydraulické, mechanické, kombinace hydraulického a mechanického způsobu a v poslední době se používají i elektrické systémy [8].

### 2.2.3 Vstřikovací formy

Formy pro zpracování musí odolávat vysokým tlakům, musí poskytovat výrobky o přesných rozměrech, musí umožnit snadné vyjmutí výrobku a musí pracovat automaticky po celou dobu své životnosti. Jejich konstrukce a výroba je náročná na odborné znalosti, ale i na finanční náklady. Vstřikovací formy jsou konstrukčně velmi rozmanité a lze je rozdělit do následujících skupin :

- Podle násobnosti na jednonásobné (viz. obr.2.2.3.1) a vícenásobné.
- Podle způsobu zaformování a konstrukčního řešení na dvoudeskové, třídeskové, etážové, čelist'ové, vytáčečí,...
- Podle konstrukce vstřikovacího stroje na formy se vstřikem kolmo na dělicí rovinu a na formy se vstřikem do dělicí roviny [8].



*Obr.2.2.3.1 : Jednonásobná vstřikovací forma [8].*

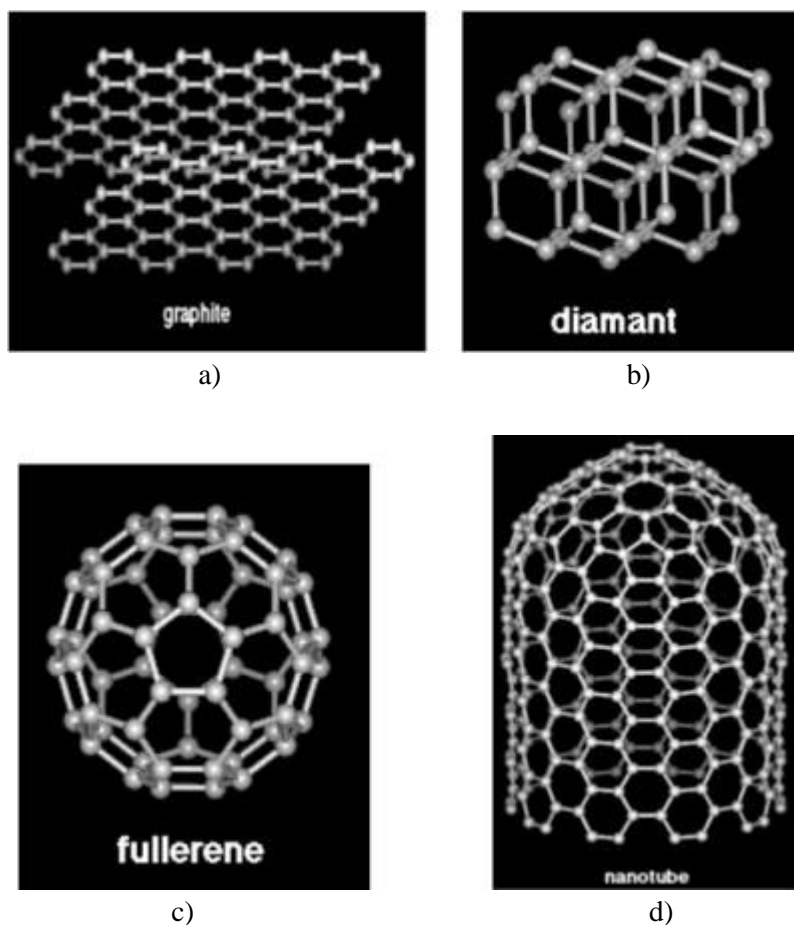
Vstřikovací forma se skládá z dílů, vymezujících tvarovou dutinu formy, z chladicího (temperačního) systému, z vtokového systému, z vyhazovacího systému a z upínacích a vodicích elementů. Jednotlivé části vstřikovacích forem lze rozdělit do dvou skupin na části konstrukční a na části funkční [8].

## 2.3 UHLÍKOVÉ NANOTRUBICE (CNTs)

### 2.3.1 Definice

CNTs jsou objekty, které postupně provedou revoluci v technologickém vývoji materiálů a technologiích. CNTs jsou relativně mladým, avšak rychle se rozvíjejícím oborem nanotechnologie [11,12].

CNTs jedná se o čtvrtou allotropickou formu uhlíku – viz. obr.2.3.1.1. CNTs jsou makromolekuly uhlíků, podobně jako tzv. Fullereny (např.  $C_{60}$ ,  $C_{70}$ ,  $C_{76}$ ...) – viz. obr.2.3.1.1.c, což jsou velké molekuly tvaru „kopacích míčů“, strany tvořené pěti- a šesti-úhelníky (v jejichž vrcholech se nachází uhlík). Lze chápat CNTs jako atomovou rovinu tuhy (grafitu – viz. obr.2.3.1.1.a) sbalenou do ruličky, na koncích uzavřenou „čepičkami“ z polovin fullerenu. Avšak konce uzavřených CNTs (viz. obr.2.3.1.1.d) podléhají vysokému pnutí, proto uzavírací struktura je poměrně nestabilní a může docházet k narušení uzavíracích konců za přeměny uzavřené nanotrubičky v otevřenou nanotrubičku [11,12,13].



Obr.2.3.1.1 : Allotropické modifikace uhlíku [14].



### 2.3.2 Terminologie

- MWCNT (multi-walled carbon nanotubes) :
  - Mnohostěnné uhlíkové nanotrubičky
  - Nejlevnější forma nanotrubeček pro běžné aplikace
  - Byly izolovány jako vedlejší produkt při tvorbě uhlíkových fullerenu
- SWCNT (single-walled carbon nanotubes) :
  - Jednostěnné uhlíkové nanotrubičky
  - Drahá forma nanotrubeček-speciální aplikace
  - Byly izolovány jednostěnné uhlíkové nanotrubičky
- DWCNT (double-walled carbon nanotubes) :
  - Dvojstěnné uhlíkové nanotrubičky
  - Perspektivní materiál budoucnosti
  - Posledním objevem byly syntetizovány dvojstěnné uhlíkové nanotrubičky [12].

### 2.3.3 Typy a struktura nanotrubiček

#### 2.3.3.1 Jednostěnné CNT (SWCNT) – viz. obr.2.3.3.1.1

Jednovrstvá CNT je tvořena jen jedinou hexagonální sítí uhlíkových atomů, která spojením protilehlých konců vytváří tvar trubky [13].

Typická jednovrstvá CNT má vnitřní průměr od 1,2 do 1,4 [nm]. Údaje o délce nanotrubičky se liší, nejčastěji se hovoří o délkách několika  $\mu\text{m}$  až po milimetry [13].



*Obr.2.3.3.1.1 : SWCNT [13].*

### 2.3.3.2 Vícevrstvé CNT (MWCNT)

Vícevrstvé CNT (viz. obr.2.3.3.2.1) lze charakterizovat jako nanotrubky, jejichž plášť je tvořen dvěma nebo více vrstvami z kovalentně vázaných uhlíkových atomů v hexagonální síti. Popsány jsou dva základní typy struktur vícevrstevných CNT.

- V případě prvního typu je provedeno hypotetické rolování jedné grafitové vrstvy do svitku. Na rozdíl od SWCNT, konce rolované hexagonální sítě nejsou v případě MWCNT spojeny.
- Druhým typem struktury MWCNT je koncentrická struktura. Hypoteticky může vzniknout současným srolováním několika grafitových vrstev do koncentrické soustavy několika CNT [13].

Vícevrstvé CNT mohou obsahovat až několik desítek stěn. Průměr MWCNT bývá nejčastěji uváděn v rozmezí od 2 do 100 [nm] s typickými hodnotami 10-20 [nm]. Délka MWCNT je variabilní, typicky v řádu [ $\mu\text{m}$ ] [13].



*Obr.2.3.3.2.1 : MWCNT (třívrstvá CNT) [13].*

### 2.3.4 Vlastnosti nanotrubic

- Hustota 1,35 [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]
- Nanotrubky mají unikátní mechanické vlastnosti
  - Youngův modul 1 [TPa] (SWCNT) a 1,2 [TPa] (MWCNT), Ocel 230 [GPa]
  - Mez pevnosti v tahu 60-100 [GPa], Ocel 1 [GPa]
  - Max.deformace 10-30 [%]
- Elektrické vlastnosti
  - Odpor  $10^{-4}$  [ $\Omega/\text{cm}$ ]
  - Max.proudová hustota  $10^{12}$ - $10^{13}$  [ $\text{A}/\text{m}^2$ ]
- Tepelná vodivost
  - Jednotěnné 1750-5800 [ $\text{W}/\text{mK}$ ]
  - Mnohostěnné >3000 [ $\text{W}/\text{mK}$ ], měď 400 [ $\text{W}/\text{mK}$ ] [16].

#### 2.3.4.1 Elektrická vodivost

V závislosti na chirálním vektoru mohou být nanotrubky s malým průměrem buď kovově vodivé nebo polovodivé. Rozdíly ve vodivosti jsou způsobeny molekulární strukturou, která ovlivňuje natočení vazeb a tedy vodivé pásy a potenciální bariéry. Bylo zjištěno, že kovově vodivé jsou takové nanotrubky pro které platí, že rozdíl  $(n-m)$  je dělitelný třemi nebo je nulový. Bylo dokázáno, že elektrický odpor nanotrubeček nezávisí na jejich délce [15].

#### 2.3.4.2 Optická aktivita

Teoretické studie odhalily, že optická aktivita chirálních nanotrubeček se s rostoucí velikostí zmenšuje. Lze tedy předpokládat, že i další fyzikální vlastnosti nanotrubeček jsou těmito parametry ovlivňovány také [15].

#### 2.3.4.3 Mechanická pevnost

CNTs mají velmi velký Youngův modul ve směru své osy. Celá nanotrubka je díky své délce velmi flexibilní, což umožňuje využití v kompozitních materiálech, které využijí anizotropní vlastnosti nanotrubeček [15].

### 2.3.5 Metody výroby nanotrubíčky

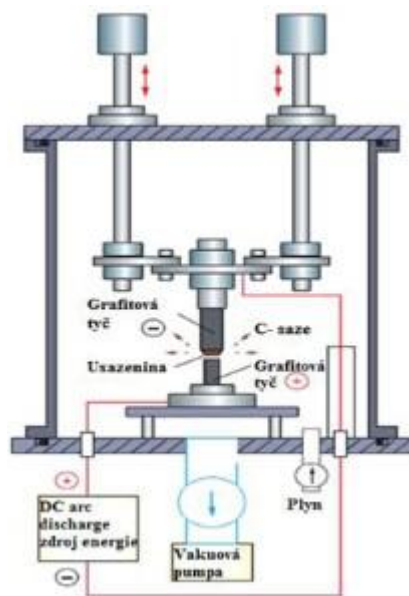
V současné době se pro výrobu CNTs používají 3 hlavní technologie :

- Výboj elektrického oblouku :
  - Produkce CNT-70[%] nanotrubeček, zbytek je amorfni uhlík a nanočástice katalyzátoru. Nanotrubky se musí následně vhodným procesem čištění extrahovat.
- Laserová ablace :
  - Produkce CNT-70[%] nanotrubeček, zbytek je amorfni uhlík a nanočástice katalyzátoru. Nanotrubky se musí následně vhodným procesem čištění extrahovat.
- Chemická depozice par (CVD) :
  - Technologicky náročná výroba-ovlivňuje výslednou cenu nanotrubeček. Výsledná produkce 90[%] nanotrubeček, zbytek amorfni uhlík [12].

#### 2.3.5.1 Výboj elektrického oblouku (Arc Discharge)

Výboj elektrického oblouku (viz. obr.2.3.5.1.1) probíhá mezi dvěma grafitovými elektrodami v ochranné atmosféře helia, z nich jedna je naplněna katalytickým kovovým práškem-katalyzátorem (např. nikl, železo, kobalt) [12].

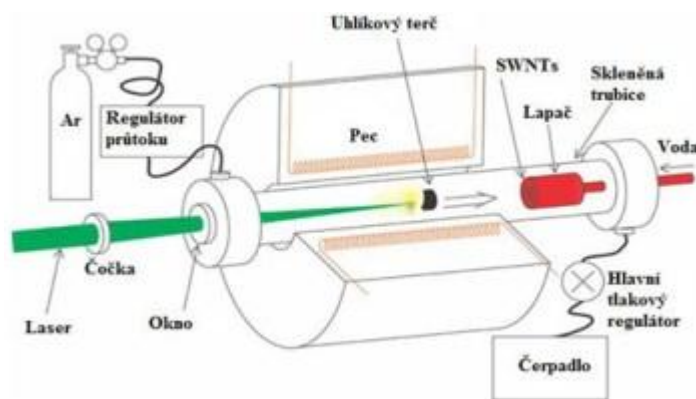
Katalyzátor působí jako templát, na kterém rostou nanotrubice. Řízením rozměru, typu katalyzátoru a reakční doby se může snadno upravovat jak průměr nanotrubice, tak i jejich délka [12].



Obr. 2.3.5.1.1 : Schéma aparatury pro přípravu CNT metodou Arc Discharge [17].

### 2.3.5.2 Laserová ablace

Laserová ablace (viz. obr.2.3.5.2.1) používá k odpaření grafitového terče laser. Terč je rovněž naplněn katalyzátorem. Katalyzátor opět působí jako templát, na kterém rostou nanotrubice. Řízením rozměru, typu katalyzátoru a reakční doby se může snadno upravovat jak průměr nanotrubic, tak i jejich délka [12].

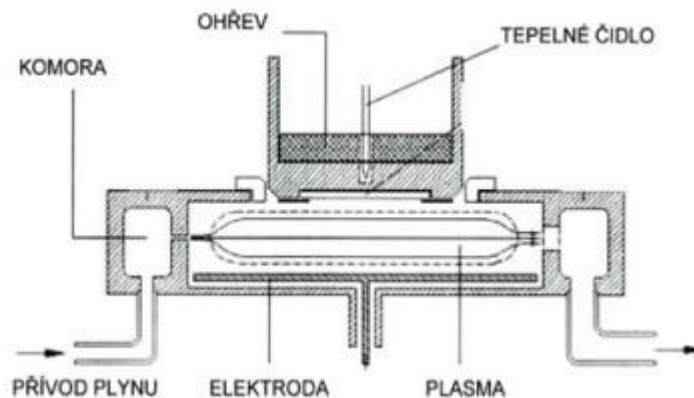


Obr. 2.3.5.2.1 : Schéma aparatury pro přípravu CNT metodou laserové ablace [17]

### 2.3.5.3 Chemická depozice par (CVD)

Chemická depozice par (CVD – viz. obr.2.3.5.3.1) používá při reakci s uhlíkovým plynem jako katalyzátor kovové nanočástice (nikl, kobalt, železo,...) při teplotách 500-

900 [°C]. Variantou tohoto procesu je PECVD, při které mohou snadno růst vertikálně vyrovnané CNT [12].



Obr. 2.3.5.3.1 : Schéma aparatury pro přípravu CNT metodou CVD [17].

### 2.3.6 Aplikace

Specifické vlastnosti uhlíku spolu s molekulární dokonalostí jednotěnných CNT dávají tomuto materiálu vyjímečně dobré vlastnosti jako je elektrická a tepelná vodivost, pevnost, tvrdost, a odolnost [15].

#### ❖ Příklady aplikací :

- Vodivé plasty : během posledního půlstoletí se plastovými materiály snažíme nahradit materiály kovové. Pokud jde o mechanické vlastnosti, tak za tu dobu plasty urazily dlouhou cestu, ale tam, kde je potřeba elektrické vodivosti, jsou stále nepoužitelné.
  - Plasty jsou dobře známé izolanty. Tuto nevýhodu je možné odstranit použitím vodivých plnidel jako jsou saze nebo uhlíkové vlákno. Potřebný obsah plnidel je většinou vysoký.
- Úložiště energie : jednovrstvé nanotrúbky jsou potřebné v materiálech pro elektrody v bateriích a v kondenzátorech.
- Molekulární elektronika : klíčovou součástí nanotechnologie je stavba elektrických obvodů z elementárních částic, z molekul. Elektrická vodivost a geometrie nanotrúbek je činí ideálními materiály pro vodiče v molekulární elektronice
  - je dokonce možné vyrobit tranzistory z nanotrúbek
  - růst CNTs na waferu-vyleštěném křemíkovém plátku, na němž vznikají počítačové čipy.
- Tepelné materiály : rekordní anizotropní tepelná vodivost nanotrúbek je přímo předurčuje pro použití tam, kde je potřeba převést teplo z jednoho místa na druhé. Například ve výpočetní technice, kde teploty nechlazených procesorů snadno překračují 100 [°C].

- Kompozitní materiály : nanotrubky jsou díky své tvrdosti ideální ve vysokopevnostních a lehkých kompozitech. Jednou z nejdůležitějších aplikací nanotrubek bude jejich použití jako výztuže v kompozitních materiálech.
- Superpevná fólie z nanotrubek : tenká fólie 50 [nm] s hustotou 0,5[g/cm<sup>3</sup>] a výbornými mechanickými vlastnostmi. Výborné je, že fólie je elektricky vodivá a průhledná. Velmi tenká vodivá fólie umožní výrobu lepších kondenzátorů a mohla by se uplatnit v ohebných displejích [15,18].

### 3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

#### 3.1 POPIS POUŽITÉHO MATERIÁLU – PLASTICYL™ PA1503

Polymer použitý v experimentu nese obchodní název : PLASTICYL™ PA1503 (viz obr.3.1.a), jedná se o směs CNT a polyamidu 6. Na trh to dodává firma NANOCYL.

PLASTICYL™ je skupina mnohostěnných uhlíkových nanotubic (MWCNT : Multi-walled carbon nanotubes) termoplastických koncentrátů pro aplikace, které vyžadují vynikající elektrickou vodivost a elektrostatické výbojové (ESD) vlastnosti.

PLASTICYL™ PA1503 je vodivá předsměs, která je založena na polyamidu 6. Vzhledem ke svému relativně dobrému toku (viz. tab.3.1.b) formulace, PLASTICYL™ PA1503 je ideální pro standardní vstřikovací a vytlačovací procesy. Složení můžeme vidět v tabulce 3.1.c.

##### ❖ Charakteristika materiálu Polyamid 6 (PA6)

Polyamid 6 (PA6) je houževnatý termoplast, tvořený lineárními makromolekulami s obsahem krystalického podílu v rozsahu 25 až 45 % [19].

Pevnost v tahu se podle obsahu monomeru a vody mění v rozsahu 40 až 80 MPa, modul pružnosti od 900 do 1600 MPa. Vykazuje značný sklon ke křípu. Konstrukční vlastnosti lze zlepšit přidáním skleněných vláken. Teplota tání je vysoká a bývá v rozsahu 220 až 250 °C, teplota zesklnění je asi 40 °C. Přítomnost vody snižuje teplotu zesklnění pod 0 °C [19].

PA6 má mimořádnou odolnost proti otěru a má nízký koeficient tření. Elektrické vlastnosti jsou špatné v důsledku silné polarizace hmoty a slunečního záření způsobuje silné zhoršování vlastností [19].



*Obr.3.1.a : Použitý materiál PLASTICYL™ PA1503.*

*Tab.3.1.b : Stanovení indexu toku po smísení s CNT.*

	Norma	Jednotky	Čistý polyamid 6	Směs do 1% hmotnosti CNT	Směs do 3% hmotnosti CNT
Index toku taveniny (280°C; 1,2 kg)	ISO 1133:1997	g/10 min	-	42,48	5,40

*Tab.3.1.c : Složení / informace o složkách.*

Komponenty	Číslo CAS	% Hmotnost	Klasifikace
Polyamid 6	25038-54-4	85%	/
Syntetický grafit (Uhlíkové nanotrubičky)	7782-42-5	15%	/

- ❖ Materiál se používá na :
- ESD (elektrostatický výboj) a elektricky vodivé části,
  - Automobilový průmysl, průmyslové podniky,
  - Vstřikování, vytlačování.

### **3.1.1 Fyzikální a chemické vlastnosti**

Forma a barva : černý granulát

Zápach : bez zápachu

Bod tání / rozmezí : 221[°C]

Viskozita : nezměřitelná

Hustota : 1,175 [g/cm<sup>3</sup>]

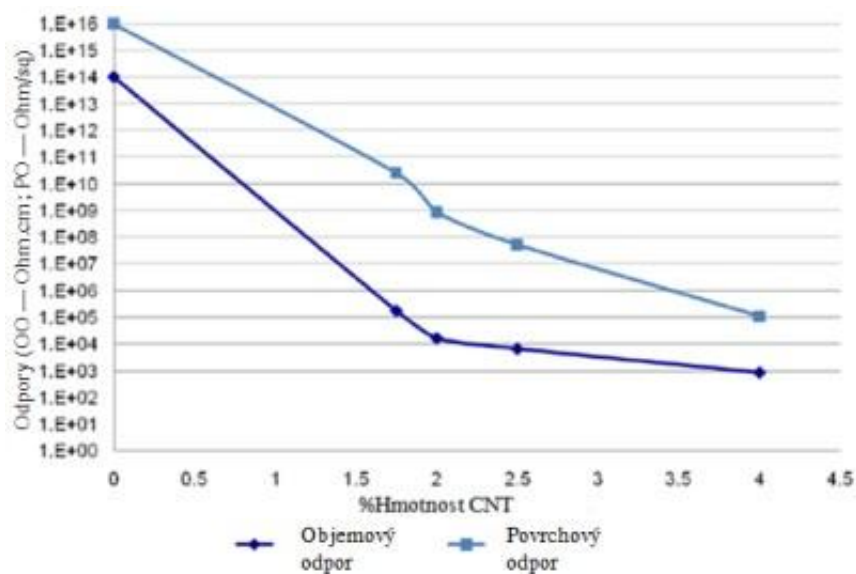
Rozpustnost ve vodě : nerozpustný

Teplota vznícení : není stanovena



### 3.1.2 Infiltrační křivky pro objemový a povrchový odpor

Na obrázku 3.1.2.1 můžete vidět infiltrační křivky pro objemový a povrchový odpor.



Obr.3.1.2.1 : Infiltrační křivky pro objemový a povrchový odpor.

## 3.2 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

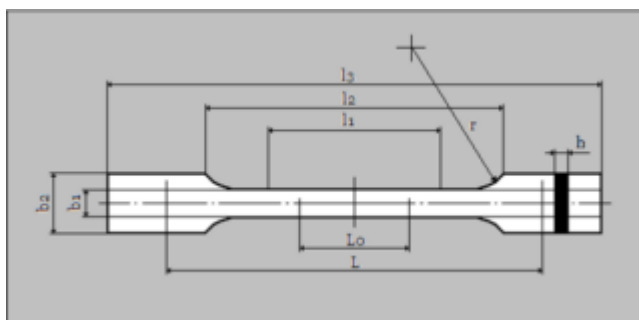
Technologie přípravy zkušebních těles je zpravidla stejná jako technologie zpracování zkoušeného plastu na finální výrobek.

Zkušební tělesa mají geometrie, které odpovídají mezinárodnímu standardu ČSN EN ISO 3167, byla vyrobena vstřikováním z použitého materiálu PLASTICYL™ PA1503 na vstřikovací stroji ARBURG 270S 400-100 (viz. obr.3.3.1) v souladu s ČSN EN ISO 294-1, je předpisem stanovující obecné principy a vstřikování víceúčelových zkušebních těles.

Zkušební tělesa tvaru oboustranných lopatek (viz. obr.3.2.1) typu 1A nebo 1B se používají pro zatěžovací zkoušky plastů dle ČSN EN ISO 527 a ČSN EN ISO 3167. Typ 1A byl použit při tomto experimentu, v tabulce 3.2.2 jsou uvedeny hodnoty jednotlivých rozměrů. Zkušební tělesa typu 1A byla vyrobena vstřikováním do formy (viz. obr.3.2.3) obsahující dvě tvarové dutiny s vtokem do dělicí roviny. Zkušební tělesa typu 1B pro mechanicky obráběná tělesa [23].



a



b

Obr. 3.2.1 : Zkušební tělesa [23.]

Tab. 3.2.2 : Hodnoty jednotlivých rozměrů zkušebního tělesa [23].

Popis	Symbol	Rozměr
Počáteční vzdálenost čelistí	L	115±1 mm
Počáteční měřená délka	$L_0$	50±0,5 mm
Délka zúžené rovnoběžné části	$l_1$	80±2 mm
Rozpětí mezi širokými částmi	$l_2$	104 až 113 mm
Celková délka	$l_3$	≥150 mm
Doporučená tloušťka	h	4±0,2 mm
Poloměr	r	20 až 25 mm
Šířka zúžené rovnoběžné části	$b_1$	10±0,2 mm
Šířka konců	$b_2$	20±0,2 mm



Obr. 3.2.3 : Vstřikovací forma.

### 3.3 POPIS STROJE

Aby se dosáhlo dobré kvality výstřiku, je důležitá vhodná volba vstřikovacího stroje pro danou vstřikovací formu. Stroj musí zabezpečit dostatečnou vstřikovací kapacitu, plastikační kapacitu, uzavírací a přidržovací sílu, vstřikovací tlak, průměr šneku ale mimo jiné musí mít také vhodné konstrukční parametry, vhodnou velikost upínacích desek, dostatečné otevření respektive uzavření v závislosti na stavební výšce formy, atd.

K realizaci bakalářské práce byl využit standardní vstřikovací stroj ARBURG 270S 400-100, viz. obr.3.3.1. ARBURG se zaměřil na automatizované vstřikování plastů do forem s uzavírací silou mezi 125 [kN] a 5000 [kN]. Patří mezi světové lídry ve výrobě nejen vstřikovacích strojů, ale i robotických systémů, komplexních výrobních pracovišť a periferií. Parametry stroje jsou uvedeny v tab. 3.3.2.a a v tab. 3.3.2.b.



Obr. 3.3.1 : Vstřikovací stroj ARBURG 270S 400-100.

Tab. 3.3.2.a : Parametry vstřikovacího stroje ARBURG 270S 400-100-vstřikovací jednotka.

Průměr šneku	mm	20	25	30
Délka šneku	L/D	25	20	16,7
Zdvih dávkování	mm		100	
Otáčky šneku max.	m/min <sup>-1</sup>	28	35	42
Plastikační výkon měřeno podle norem	kg/hod	5,5	8	9,5
Vstřikované množství teoretické hodnoty	cm <sup>3</sup> /s	64	100	146
Max. objem zdvihu	cm <sup>3</sup>	31	49	71
Max. hmotnost výlisku	g	29	45	65
Specifický vstřikovací tlak	bar	2500	2000	1390
Zvýšený specifický vstřikovací tlak	bar			
Zdvih agregátu × přídržná síla trysky	mm × kN		180 × 50	
Instalovaný příkon topení plastikačního válce	kW		4,9	
Počet topných pásů			4	

Tab. 3.3.2.b : Parametry vstřikovacího stroje ARBURG 270S 400-100-uzavírací jednotka.

Uzavírací síla	400 kN
Dráha otevření lisovacího nástroje	350 mm
Vestavěná výška formy min.	200 mm
Max. otevření upínacích desek	500 mm
Velikost upínacích desek horizontální × vertikální	380 × 380 mm
Zvětšené upínací desky horizontální × vertikální	380 × 380 mm
Vzdálenost mezi sloupky horizontální × vertikální	270 × 270 mm
Šířka vypadávací šachty	300 mm
Zdvih vyhazovače × síla vyhazovače	100 × 20 mm × kN
Běh naprázdno × zdvih	1,2 × 189 s × mm

### 3.4 PARAMETRY VSTŘIKOVÁNÍ

V tabulce 3.4.1 můžete vidět parametry vstřikování stroje ARBURG 270S 400-100.

Tab. 3.4.1 : Parametry vstřikování.

Dávka	40 cm <sup>3</sup>
Polštář	16,1 cm <sup>3</sup>
Vstřikovací rychlost	30 cm <sup>3</sup> /s
Doba dotlaku	35 s
Velikost dotlaku	1200 bar
Tlak při přepnutí	1650 bar
Doba chlazení	15 s
Doba cyklu	60 s
Teplota taveniny	280 °C
Teplota formy	80 °C

### 3.5 MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Některé plasty jsou navlhavé, čili hygroscopické a před vlastním zpracováním se musí sušit. To znamená zbavit absorbované vlhkosti, neboť přítomnost vody se projevuje zhoršováním kvality povrchu výrobků i poklesem mechanických vlastností, zejména u plastů, u nichž voda při zvýšené teplotě způsobuje štěpení makromolekul [8].

Doba a teplota sušení pro použitý materiál PA6 :

- Teplota sušení [°C] : 80
- Doba sušení [hod] : 7

#### 3.5.1 Tahová zkouška

Mechanické vlastnosti zjišťované zkouškou tahem závisí na struktuře, tvaru zkušebního tělesa, rychlosti zatěžování a zkoušení (vlhkosti a teplotě). Zkušební těleso je protahováno ve směru své hlavní osy konstantní rychlostí zkoušení do jeho porušení nebo do okamžiku předem

nastavené hodnoty deformace. Během zkoušky se měří zatížení působící na zkušební těleso a prodloužení.

- Použijeme zařízení HOUNSFIELD H10KT (viz. obr.3.5.1.1) s průtahoměrem 100RS a s řídicím programem QMAT.
- Rozměry vstříkovaného zkušební tělesa odpovídají ISO 527-1, 2.
- Zkoušky byly provedeny na vzorcích, které byly ponechány min.24 hodin v prostředí zkušební laboratoře (teplota vzduchu  $23 \pm 2$  °C, relativní vlhkost vzduchu  $50 \pm 5$  %).
- Zatěžujeme standardní rychlostí 50 mm/min do okamžiku jejich porušení (popř. do mezní deformace za mezní pevnosti v tahu).
- Určujeme napětí na mezní pevnosti v tahu, napětí na mezní kluzu, napětí při přetržení a jejich příslušná prodloužení.
- Zatěžujeme 5 vzorků, které vyhovují přijatelným kritériím porušení zkušebních těles dle ISO 527-1, 2.



*Obr.3.5.1.1 : Zařízení HOUNSFIELD H10KT.*

### **3.5.2 Ohybová zkouška**

Mechanické vlastnosti zjišťované zkouškou ohybem závisí na struktuře, tvaru zkušební tělesa, rychlosti zatěžování a zkoušení (vlhkosti a teplotě). Zkušební těleso, podepřené jako nosník dvěma podpěrami (třibodový ohyb), je konstantní rychlostí prohýbáno trnem působícím uprostřed rozpětí podpěr tak dlouho, dokud se těleso nezlomí nebo dokud deformace nedosáhne předem stanovené hodnoty. V průběhu procesu je měřena síla působící na těleso.

- Použijeme zařízení HOUNSFIELD H10KT (viz. obr.3.5.1.1) s řídicím programem QMAT.
- Rozměry vstřikovaného zkušební tělesa odpovídají ISO 178.
- Zkoušky byly provedeny na vzorcích, které byly ponechány min.24 hodin v prostředí zkušební laboratoře (teplota vzduchu  $23\pm 2$  °C, relativní vlhkost vzduchu  $50\pm 5$  %).
- Zatěžujeme standardní rychlostí 2mm/min až do jejich porušení, popř. definovaného průhybu za mezí pevnosti v ohybu.
- Určujeme pevnost v ohybu, napětí v ohybu při smluvním průhybu odpovídající ohybové deformaci 3,5 % a z křivky napětí-deformace modul pružnosti v ohybu.
- Zatěžujeme 5 vzorků.

### 3.5.3 Zkouška tvrdosti

#### ❖ Metoda vtlačení hrotu tvrdoměru (Shore)

Podstatou zkoušky je vtlačení specifikovaného hrotu do vzorku ( $t_{\min} = 6\text{mm}$ ) za stanovených podmínek.

Zkušební těleso umístěné na tvrdý rovný vodorovný povrch. Tvrdoměr přiložíme kolmo na zkušební těleso tak, aby špička zkušební hrotu byla nejméně 12mm od kteréhokoli okraje zkušební tělesa. Opěrnou patku přitlačíme co nejrychleji a bez nárazu na zkušební těleso, přičemž musí být stále rovnoběžná s povrchem zkušební tělesa.

- Použijeme tvrdoměr Shore s testovací hlavicí D (viz. obr.3.5.3.1).
- Tlak volíme aby došlo k pevnému kontaktu mezi opěrnou patkou a zkušebním tělesem.
- Tvrdost odečteme na stupnici přístroje po uplynutí ( $15\pm 1$ ) sec. Pokud je požadována počáteční (okamžitá) hodnota tvrdosti, odečteme hodnotu do 1 sec.
- Provedeme 10 měření.



*Obr.3.5.3.1 : Tvrdoměr Shore s testovací hlavicí D.*

### 3.5.4 Rázová zkouška

Zkušební těleso umístěné vodorovně v podpěrách je přeraženo úderem rázového kladiva, přičemž směr nárazu je veden středem vzdáleností mezi podpěrami.

- Použijeme zařízení CEAST Resil 5.5J (viz. obr.3.5.4.1).
- Stanovíme rázovou houževnatost dle mezinárodních standardů ČSN EN ISO 179.
- Zkoušky byly provedeny na vzorcích, které byly ponechány min.24 hodin v prostředí zkušební laboratoře (teplota vzduchu  $23\pm 2$  °C, relativní vlhkost vzduchu  $50\pm 5$  %).
- Rychlost kladiva v bodě impaktu dle příslušné normy : 2,9 m/s.
- Nominální energie kyvadla 4J.
- Počet zkoušených těles 10.



*Obr.3.5.4.1 : Zařízení CEAST Resil 5.5J.*

### 3.5.5 Vrubová zkouška

Zkušební těleso umístěné vodorovně v podpěrách je přeraženo úderem rázového kladiva. Dopadá kladivo na stranu protilehlou k vrubu, resp. na stranu s vrubem v dané vzdálenosti od osy vrubu.

- Použijeme zařízení CEAST Resil 5.5J (viz. obr.3.5.4.1).
- Stanovíme rázovou houževnatost dle mezinárodních standardů ČSN EN ISO 179.
- Zkoušky byly provedeny na vzorcích, které byly ponechány min.24 hodin v prostředí zkušební laboratoře (teplota vzduchu  $23\pm 2$  °C, relativní vlhkost vzduchu  $50\pm 5$  %).
- Rychlost kladiva v bodě impaktu dle příslušné normy : 2,9 m/s.
- Nominální energie kyvadla 0,5J.
- Počet zkoušených těles 10.

### 3.6 VÝSLEDKY

Podmínky měření a naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách. Dále je vykreslen průběh tahové a ohybové zkoušky.

#### 3.6.1 Tahová zkouška

Postup měření byl proveden v souladu s normou ČSN EN ISO 527-1, 2. Podmínky pro stanovení tahových vlastností jsou uvedeny v tabulce 3.6.1.1.

Tab. 3.6.1.1 : Podmínky měření.

Norma	ČSN EN ISO 527-1, 2
Rozměr zkušebních vzorků	1A dle ISO 527
Rychlost zatěžování	50 mm/min
Vzdálenost měřená tenzometrem	50 mm

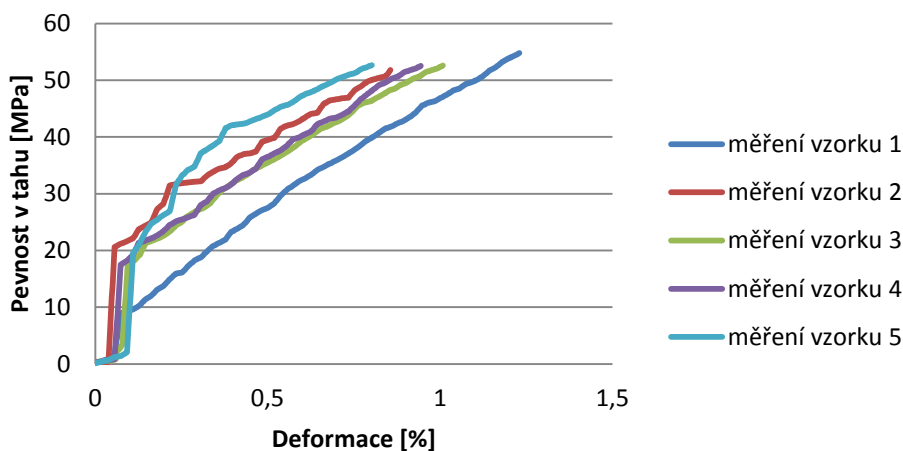
Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.6.1.2. Ve výsledcích můžeme vidět aritmetický průměr pevnosti v tahu je  $\sigma = 52,872 \pm 1,137$  [MPa]. Aritmetický průměr tažnosti je  $\varepsilon = 0,968 \pm 0,176$  [%].

Tab. 3.6.1.2 : Tahová zkouška.

	Tahová zkouška PA6 15 % CNT				
$\sigma$ [MPa]	54,79	51,8	52,57	52,55	52,65
$\varepsilon$ [%]	1,23	0,856	1,008	0,944	0,802
Průměr $\sigma = 52,872$ [MPa]			Průměr $\varepsilon = 0,968$ [%]		
$s = 1,137$ [MPa]			$s = 0,176$ [%]		

❖ Průběh tahové zkoušky – viz. obr.3.6.1.3.

#### Průběh tahové zkoušky pro 5 vzorků



Obr.3.6.1.3 : Průběh tahové zkoušky.



### 3.6.2 Ohybová zkouška

Postup měření byl proveden v souladu s normou ČSN EN ISO 178. Podmínky pro stanovení ohybových vlastností jsou uvedeny v tabulce 3.6.2.1.

Tab. 3.6.2.1 : Podmínky měření.

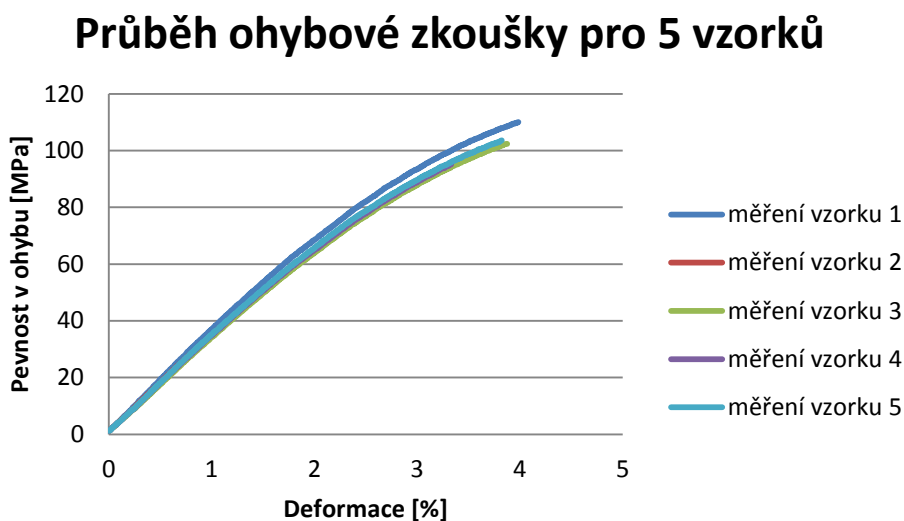
Norma	ČSN EN ISO 178
Rozměr zkušebních vzorků	ČSN EN SIO 178
Rychlost zatěžování	2mm/min

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.6.2.2. Ve výsledcích můžeme vidět aritmetický průměr pevnosti v ohybu je  $\sigma = 99,504 \pm 9,030$  [MPa]. Aritmetický průměr deformace je  $\varepsilon = 3,579 \pm 0,461$  [%].

Tab. 3.6.2.2 : Ohybová zkouška.

	Ohybová zkouška PA6 15 % CNT				
$\sigma$ [MPa]	103,56	110,04	86,4	102,36	95,16
$\varepsilon$ [%]	3,823	3,985	2,885	3,875	3,331
Průměr $\sigma = 99,504$ [MPa]			Průměr $\varepsilon = 3,579$ [%]		
s = 9,030 [MPa]			s = 0,461 [%]		

#### ❖ Průběh ohybové zkoušky



Obr.3.6.2.3 : Průběh ohybové zkoušky.

### 3.6.3 Zkouška tvrdosti

Zkouška tvrdosti Shore se používá k určení tvrdosti. Hrot má kuželovitý tvar (typ D). Hodnota se odečítá na stupnici tvrdosti po 15 sec.

Postup měření byl proveden v souladu s normou ČSN EN ISO 868. Deset vzorků bylo měřeno. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 3.6.3.1. Můžeme vidět, že aritmetický průměr tvrdosti je  $78,13 \pm 1,11$  [-].

Tab. 3.6.3.1 : Zkouška tvrdosti.

Zkouška tvrdosti (Shore D) – PA6 15% CNT				
77,4	78,6	79,2	78,6	79,5
78,5	76,8	75,9	78,3	78,5
Průměr = 78,13 [-]		s = 1,11 [-]		

### 3.6.4 Rázová zkouška

Postup měření byl proveden v souladu s normou ČSN EN ISO 179. Podmínky měření jsou uvedeny v tabulce 3.6.4.1.

Tab. 3.6.4.1 : Podmínky měření.

Metody	Charpy
Norma	ČSN EN ISO 179
Rozměr zkušebních vzorků	ČSN EN ISO 179
Nominální energie kladiva	4 J

Bylo provedeno 10 měření rázové houževnatosti. V tabulce 3.6.4.2 můžeme vidět výsledky rázové houževnatosti. Aritmetický průměr rázové houževnatosti je  $a_n = 14,677 \pm 3,513$  [kJ/m<sup>2</sup>].

Tab. 3.6.4.2 : Rázová zkouška.

	Rázová zkouška PA6 15 % CNT				
E <sub>n</sub> [J]	0,634	0,684	0,675	0,646	0,786
a <sub>n</sub> [kJ/m <sup>2</sup> ]	15,85	17,1	16,875	16,15	19,65
E <sub>n</sub> [J]	0,586	0,653	0,417	0,49	0,318
a <sub>n</sub> [kJ/m <sup>2</sup> ]	14,2	16,325	10,425	12,25	7,95
	Průměr a <sub>n</sub> = 14,677 [kJ/m <sup>2</sup> ]				
	s = 3,513 [kJ/m <sup>2</sup> ]				

### 3.6.5 Vrubová zkouška

Postup měření byl proveden v souladu s normou ČSN EN ISO 179. Podmínky měření jsou uvedeny v tabulce 3.6.5.1.

*Tab. 3.6.5.1 : Podmínky měření.*

Metody	Charpy
Norma	ČSN EN ISO 179
Rozměr zkušebních vzorků	ČSN EN ISO 179
Nominální energie kladiva	0,5 J

Bylo provedeno 10 měření vrubové houževnatosti. V tabulce 3.6.5.2 můžeme vidět výsledky vrubové houževnatosti. Aritmetický průměr vrubové houževnatosti je  $a_k = 3,275 \pm 0,661$  [kJ/m<sup>2</sup>].

*Tab. 3.6.5.2 : Vrubová zkouška.*

	Vrubová zkouška PA6 15 % CNT				
$E_n$ [J]	0,093	0,093	0,062	0,109	0,136
$a_k$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	2,906	2,906	1,938	3,406	4,25
$E_n$ [J]	0,127	0,116	0,107	0,113	0,092
$a_k$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	3,969	3,625	3,344	3,531	2,875
	Průměr $a_k = 3,275$ [kJ/m <sup>2</sup> ]				
	$s = 0,661$ [kJ/m <sup>2</sup> ]				

## 4. DISKUSE A ZÁVĚR

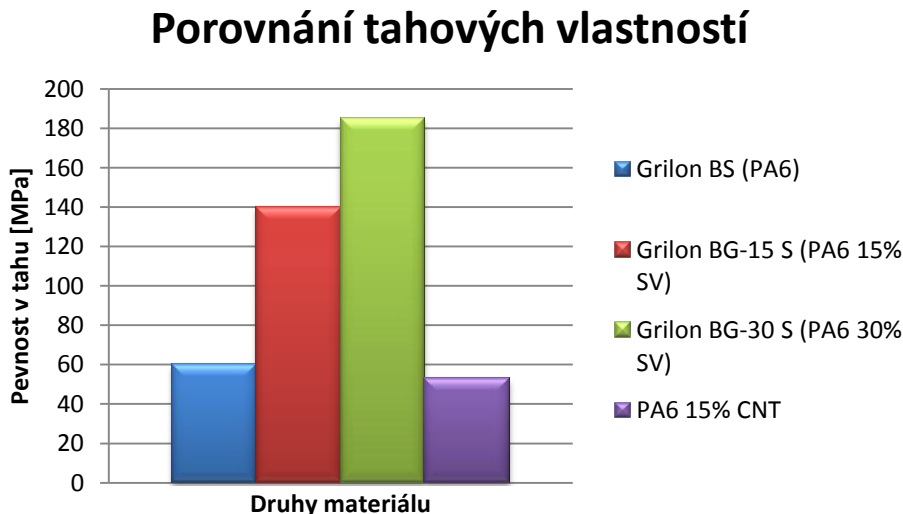
Cílem bakalářské práce bylo vyrobit zkušební tělesa z kompozitního materiálu s uhlíkovými nanotrubičkami od firmy Nanocyl (PA6 15% CNT) a vyhodnotit výsledné vlastnosti.

Bakalářská práce se skládá z teoretické a experimentální části. V teoretické části bakalářské práce jsou popsány kompozity, je zde proveden popis uhlíkových nanotrubiček, jejich výroba a vlastnosti a je zde popsána technologie vstřikování plastů.

V experimentální části je popsána výroba vstřikovaných těles a postup měření vybraných mechanických, fyzikálních a rázových vlastností. Na zkušebních tělesech byla provedena tahová, ohybová, rázová, vrubová zkouška a zkouška tvrdosti včetně vyhodnocení naměřených hodnot.

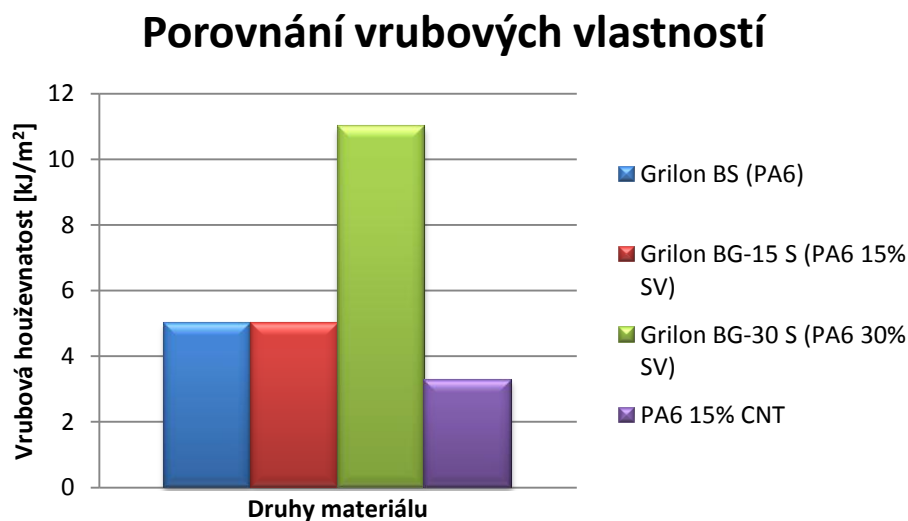
Pro přehledné porovnání byly získané hodnoty z provedených zkoušek porovnány s vlastnostmi náhodně vybraného polyamidu (Grilon, výrobce EMS) bez plniva a s plnivem ve formě skleněných vláken. Na obrázku 4.1 je vidět porovnání tahových vlastností PA6 (bez příměsí) s PA6 15% CNT, 15% a 30% skleněných vláken (SV). Obdobné porovnání je provedeno i u vrubových vlastností můžete (viz obr. 4.2) a rázových vlastností (viz obr. 4.3). Tyto srovnávací grafy ukazují, že zkoušený materiál PA6 s 15% CNT má obdobné mechanické vlastnosti, jako standardní PA6, avšak je velmi křehký. Oproti PA6 s 30% SV však vykazuje mechanické vlastnosti mnohem nižší. Při porovnatelném procentuálním obsahu uhlíkových nanotrubiček a skleněných vláken jsou tahové a rázové vlastnosti zhruba třetinové, vrubové vlastnosti zhruba poloviční.

### ❖ Porovnání tahových vlastností



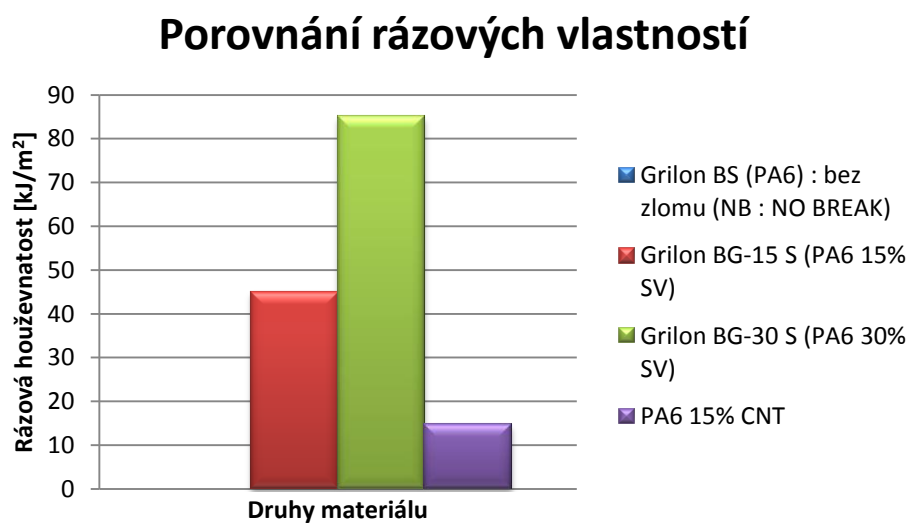
Obr. 4.1 : Porovnání tahových vlastností.

❖ **Porovnání vrubových vlastností**



*Obr. 4.2 : Porovnání vrubových vlastností.*

❖ **Porovnání rázových vlastností**



*Obr. 4.3 : Porovnání rázových vlastností.*

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] DOSTÁLOVÁ, Ludmila. STUDIUM MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ UHLÍKOVÝCH KOMPOZITŮ. Katedra Materiálu FS, 2002. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Doc. Ing. Karel Daďourek, Csc.
- [2] A. BAREŠ, Richard. KOMPOZITNÍ MATERIÁLY. Praha: Nakladatelství technické literatury, N. P, 1988. ISBN 04-734-88.
- [3] VRBKA, Jan. MECHANIKA KOMPOZITŮ [online]. Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2008[cit. 2012-02-22]. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/priloha.php?dpid=52474](http://www.vutbr.cz/www_base/priloha.php?dpid=52474)
- [4] DAĐOUREK, Karel. KOMPOZITNÍ MATERIÁLY - DRUHY A JEJICH UŽITÍ. Katedra materiálu FS: TUL, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [5] HLASOVÁ, Martina. OPTIMALIZACE ROZHRANÍ VLÁKNO MATRICE U KOMPOZITŮ S KERAMICKOU MATRICÍ [online]. Brno, 2011 [cit. 2012-02-24]. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=37819](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=37819). Diplomová práce. Vysoké Učení Technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Chlup, Ph.D.
- [6] BIBUS S. R. O. KOMPOZITNÍ MATERIÁLY\_COMAT (COMPOSITE MATERIALS GMBH) [online]. Brno[cit. 2012-02-24]. Dostupné z: [http://new.bibus.cz/pdf/Comat/Kompozitni\\_materialy\\_COMAT.pdf](http://new.bibus.cz/pdf/Comat/Kompozitni_materialy_COMAT.pdf)
- [7] BLAŽEK, Rostislav. TECHNOLOGICKÝ PROJEKT PROVOZU PRO MECHANICKÉ ZPRACOVÁNÍ VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ [online]. Zlín, 2006 [cit. 2012-02-24]. Dostupné z: [http://dspace.knihovna.utb.cz/bitstream/handle/10563/2140/bla%C5%BEek\\_2006\\_bp.pdf?sequence=1](http://dspace.knihovna.utb.cz/bitstream/handle/10563/2140/bla%C5%BEek_2006_bp.pdf?sequence=1). Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Doc. Ing. Imrich Lukovics, Csc.
- [8] LENFELD, Petr. TECHNOLOGIE II. - 2. část (Zpracování plastů). Katedra strojírenské technologie - Oddělení tváření kovů a plastů: TUL, 2006. ISBN 80-7372-037-X.
- [9] KOLOUCH, Jan. STROJÍRENSKÉ VÝROBKY Z PLASTŮ VYRÁBĚNÉ VSTŘIKOVÁNÍM. Praha: Nakladatelství technické literatury, N. P, 1986. ISBN 04-247-86.
- [10] ZLÍN PRECISION. VÝROBA TECHNICKÝCH PLASTOVÝCH DÍLŮ VSTŘIKOVÁNÍM [online]. [cit. 2012-02-22]. Dostupné z: <http://www.zlin-precision.cz/cs/vyroby/>
- [11] PURKRT, Adam. NANOTRUBKY A DALŠÍ UHLÍKOVÉ MAKROMOLEKULY [online]. [cit. 2012-02-22]. Dostupné z: <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2001-2002/Zima01/procs/nanotubes.pdf>

[12] AČR - AKTUALITY ČESKÉ REPUBLIKY. NANOTRUBKY-CARBON NANO TUBES (CNT) [online]. [cit. 2012-02-22]. Dostupné z: <http://www.acr.cz/nanomaterialy/nanotrubky-cnt.html>

[13] TEJRAL, Gracian. HMOTNOSTNÍ SPEKTROMETRIE UHLÍKOVÝCH NANOTRUBEK [online]. Brno, 2009 [cit. 2012-02-22]. Dostupné z: [http://is.muni.cz/th/165868/prif\\_d/Disrt20.pdf](http://is.muni.cz/th/165868/prif_d/Disrt20.pdf). Disertační práce. Masarykova univerzita v Brně. Vedoucí práce Prof. RNDr. Josef Havel, DrSc.

[14] LHOTÁK, Pavel. CHEMIE FULLERENŮ [online]. Praha: Ústav Organické Chemie - Vysoká škola chemicko-technologická [cit. 2012-02-22]. Dostupné z: <http://uoch.vscht.cz/cz/studium/magister/Design/fullereny.pdf>

[15] GABRYŠ, Jiří. NANOTRUBKY [online]. Nové technické materiály [cit. 2012-02-22]. Dostupné z: <http://disk.jabbim.cz/dl/cdfd83cb038b702d401851209dbb9d68/4f4556e8/sef@njs.netlab.cz/nanotrubky.pdf>

[16] MATĚJKOVÁ, Jiřina a Ondřej JAŠEK. DEPOZICE UHLÍKOVÝCH NANOTRUBEK METODOU PECVD A JEJICH ANALÝZA [online]. Brno: UPT Brno AV ČR - KFE Přírodovědecká fakulta MU Brno [cit. 2012-02-22]. Dostupné z: <http://www.isibrno.cz/lem/akt/seminar04-05-06.pdf>

[17] ROZSYPALEK, Milan. ZMĚNA ELEKTRICKÉ VODIVOSTI STLAČENÍM UHLÍKOVÉHO PAPIRU ZE ZAPLETENÝCH UHLÍKOVÝCH NANOTRUBIC [online]. Zlín, 2010 [cit. 2012-02-22]. Dostupné z: [http://dspace.knihovna.utb.cz/bitstream/handle/10563/14037/rozsyp%C3%A1lek\\_2010\\_dp.pdf?sequence=1](http://dspace.knihovna.utb.cz/bitstream/handle/10563/14037/rozsyp%C3%A1lek_2010_dp.pdf?sequence=1). Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Slobodián, Ph.D.

[18] SPOLKOVÉ MINISTERSTVO PRO VZDĚLÁVÁNÍ A VÝZKUM (BMBF), BERLÍN a Mathias SCHULENBURG, KOLÍN. NANOTECHNOLOGIE - Inovace pro zítřejší svět [online]. Lucemburk: Evropská komise, GR pro výzkum, 2007 [cit. 2012-02-22]. ISBN 92-79-00879-X. Dostupné z: <http://cordis.europa.eu/nanotechnology>

[19] LENFELD, Petr a KOLEKTIV. STROJÍRENSKÁ TECHNOLOGIE - VYBRANÉ PREZENTACE. Liberec: Technická Univerzita v Liberci, 2008. ISBN 978-80-7372-326-2.

[20] VYŠKOVSKÝ, Stanislav. TECHNOLOGIE VÝROBY ZÁKLADNÝ PŘÍSTROJE Z PLASTU [online]. Brno, 2010 [cit. 2012-02-24]. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=28525](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28525). Diplomová práce. Vysoké Učení Technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Bohumil Kandas.

[21] ŠIROKÁ, Monika. VYBAVENÍ VSTŘIKOVEN v ČR, TECHNICKO-EKONOMICKÁ STUDIE [online]. Zlín, 2009 [cit. 2012-02-24]. Dostupné z: Vybavení vstřikoven v ČR, technicko-ekonomická studie. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. David Maňas, Ph.D.

[22] ZEMAN, Lubomír. VSTŘIKOVÁNÍ PLASTŮ. Praha: Nakladatelství BEN, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3.

[23] Norma ČSN EN ISO 527 – 1,2 (640604). Plasty – Stanovení tahových vlastností. Praha : ČNI Praha, 1997.



## **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL, v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci 25.05.2012

.....

podpis

## **Declaration**

I have been notified of the fact that Copyright Act No 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purpose of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for it's use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and basic consultation with the head of thesis and a consultant.

In Liberec 25.5.2012

.....

signature